

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.017

ИОНОСФЕРНАЯ ОБЛАСТЬ РАССЕЯНИЯ ОНЧ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

А.С. Никитенко¹, М.В. Кузнецова¹, Ю.В. Федоренко¹, Ю. Маннинен²,
Н.Г. Клейменова³, С.В. Пильгаев¹, А.В. Ларченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Геофизическая обсерватория Соданкюля, Соданкюля, Финляндия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты анализа всплесков аврорального хисса, зарегистрированных в период с 7 ноября 2018 года по 9 февраля 2020 года на двух пространственно разнесенных точках - Ловозеро (Россия) и Каннуслехто (Финляндия). Всего за время наблюдений выбрано 22 события. Регистрируемые всплески были разбиты по общим признакам на четыре типа: 1) область рассеяния имеет размеры, малые относительно расстояния между станциями; 2) область рассеяния перемещается по долготе; 3) область рассеяния вытянута по долготе; 4) смешанный тип. Подробно рассмотрены примеры регистрации аврорального хисса, соответствующие тому или иному типу и сформулированы их отличительные особенности.

1. Введение

Авроральный хисс - один из типов естественных электромагнитных ОНЧ (очень низкочастотных 3 - 30 кГц) излучений, достаточно часто регистрируемых на земной поверхности. Генерация хисса происходит на высоте 10 - 20 тыс. километров в результате развития черенковской неустойчивости [1]. Наблюдения аврорального хисса на земле и на спутниках достаточно часто связаны с возникновением потока высыпавшихся электронов с энергиями < 1 кэВ [2, 3]. Волновая нормаль генерируемых волн лежит на резонансном конусе, который для электронов с малыми энергиями (< 1 кэВ) близок к 90°. Такие волны принято считать квазиэлектростатическими. Квазиэлектростатические волны не способны выйти к земной поверхности, поскольку они испытывают полное внутреннее отражение в нижней ионосфере. Кроме того, отражение может наступать и в верхней ионосфере, где частота волны становится равной локальной частоте ниже-гибридного резонанса [4]. Общепринятым механизмом выхода квазиэлектростатических волн к земной поверхности является их рассеяние на мелкомасштабных (с длиной волны от десятков до сотен метров) неоднородностях электронной концентрации в верхней ионосфере [4]. В работах [5 - 7] показано, что область в верхней ионосфере, занятая неоднородностями (далее область рассеяния), локальна. Использование данных наземных наблюдений ОНЧ аврорального хисса с привлечением моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до наземного наблюдателя [5, 7] позволяет оценить положение области рассеяния.

Положение и динамика области рассеяния представляют особый интерес для исследователей. Используя накопленный опыт наблюдения ОНЧ аврорального хисса, в данной работе предпринята попытка распределить типы областей рассеяния по общим признакам.

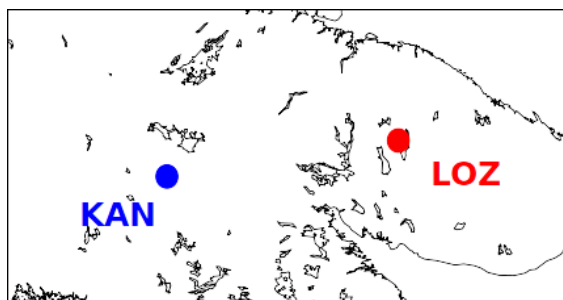


Рисунок 1. Карта расположения точек ОНЧ наблюдений Каннуслехто (KAN) и Ловозеро (LOZ).

2. Аппаратура и обработка данных

В данной работе представлены результаты наземных ОНЧ наблюдений в точках Ловозеро (LOZ, Россия) и Каннуслехто (KAN, Финляндия), разнесенных по долготе на расстояние около 400 км (рис. 1). Регистрация ведется с использованием идентичных приемников, способных измерять горизонтальные компоненты магнитного поля H_x , H_y и вертикальную компоненту электрического поля E_z . Особенности приемника являются низкий уровень собственных шумов и прецизионная привязка данных к мировому времени с ошибкой не более 1 мкс. Более подробно устройство приемника описано в работе [8]. Антенны приемников тщательно откалиброваны, что позволяет проводить сравнение результатов наблюдений на двух станциях. Калибровка магнитных антенн ведется с использованием тороида. С его помощью через плоскость антенн создается магнитный поток известной величины, после чего оцениваются АЧХ и ФЧХ измерительных каналов. ФЧХ электрической антенны оценивается с использованием эквивалента антенны. Оценка АЧХ производится из сигналов атмосфериков на частоте ниже поперечного резонанса волновода Земля-ионосфера $\sim 1,8$ кГц. Для обеспечения стабильности и точной синхронизации фазы синусоидального калибровочного сигнала используется устройство для калибровки регистраторов электромагнитного поля [9].

В данной работе ведется анализ узкополосных сигналов, полученных после фильтрации исходных записей полосовым фильтром с центральной частотой в окрестности максимума интенсивности аврорального хисса - 8 кГц, и шириной полосы 1 кГц. Для анализа излучений в данной работе используются индекс круговой поляризации магнитного поля P_c , отношение E_z/H_t , где H_t - горизонтальная компонента магнитного поля, и плотность потока энергии. Индекс P_c рассчитан в соответствии с работой [10]. Величины P_c и E_z/H_t относительно стабильны во времени, поэтому в данной работе мы рассматриваем только их усредненные значения. Плотность потока энергии представлена в виде распределения по обратному азимуту вектора Пойнтинга $\rho(\phi)$. Расчет $\rho(\phi)$ производился в предположении об эргодичности шума, при этом распределение по ансамблю реализаций заменялось распределением по времени [5,7].

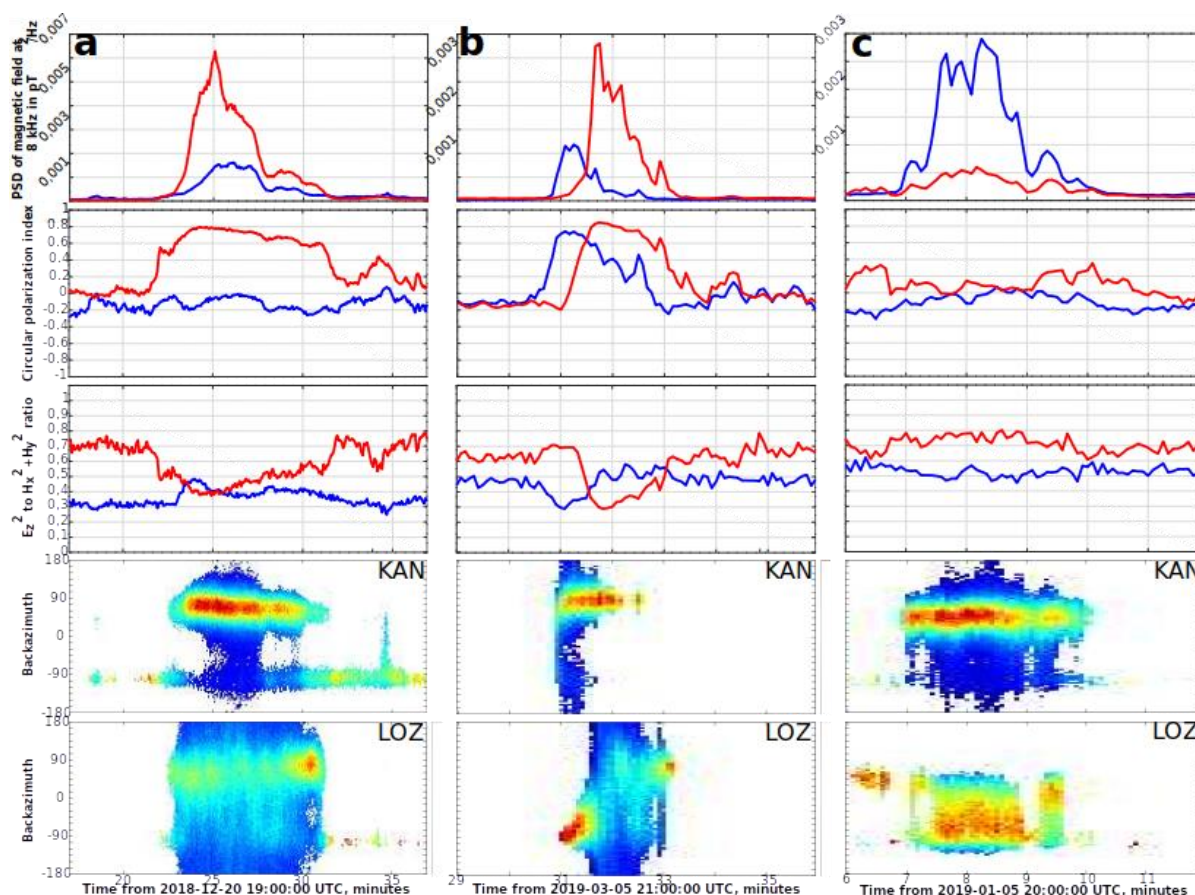


Рисунок 2 (сверху вниз) спектральная плотность мощности магнитного поля, индекс круговой поляризации, отношение вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного, распределения плотности потока энергии по азимутальным углам вектора, обратного вектору Пойнтинга, для станций KAN и LOZ в случае а) области рассеяния с размерами, малыми относительно расстояния между станциями б) перемещения области рассеяния по долготе в) области рассеяния, вытянутой по долготе.

3. Наблюдения

В работе рассматриваются всплески аврорального хисса, зарегистрированные на станциях KAN и LOZ в период с 07 ноября 2018 года по 9 февраля 2020 года, когда на станции KAN функционировал регистратор вертикальной компоненты электрического поля. Всего за этот период на станции LOZ отмечено 104 дня, когда регистрировались всплески аврорального хисса. В KAN - 88 дней. Авроральный хисс регистрировался на этих станциях в виде последовательности коротких по длительности всплесков или изолированных всплесков. Средняя продолжительность таких событий составила около 15 мин для обеих станций.

Из всего набора событий были отобраны 22 интервала, в течение которых на обеих станциях наблюдались всплески аврорального хисса. При этом выбирались случаи с отношением сигнал/шум не меньше 10 дБ. Выбранные события были распределены по общим признакам на 4 типа. Рассмотрим особенности каждого типа.

3.1 Область рассеяния с размерами, малыми относительно расстояния между станциями

Из рассматриваемых событий отмечено пять, для которых параметры поля имели схожую динамику, вызванную, на наш взгляд, существованием области рассеяния с размерами, малыми относительно расстояния между станциями. Рассмотрим отличительные особенности этой динамики. В качестве примера на рисунке 2а представлены спектральная плотность мощности магнитного поля, индекс круговой поляризации, отношение E_z/H_t и распределения плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга, рассчитанные для станций KAN и LOZ во время регистрации всплесков аврорального хисса 20 декабря 2018 года в интервале 19:17 - 19:37 UT. При существовании области рассеяния с относительно малыми размерами мощность магнитного поля на одной из станций (в данном случае LOZ) в 3 - 5 раз больше, чем на другой станции (KAN). Индекс P_c на станции с большими значениями мощности (LOZ) принимает значения, близкие к 1. Это означает, что на этой станции регистрируются волны с правой, близкой к круговой, поляризацией [5]. В данном случае точка наблюдений находится в окрестности проекции области рассеяния на земную поверхность (далее проекция области рассеяния). На соседней станции (KAN) индекс P_c меньше на 0,5 - 0,8, т.е. наблюдаемые волны испытали отражения от стенок волновода Земля-ионосфера. На станции с большим значением мощности магнитного поля (LOZ) наблюдается уменьшение параметра E_z/H_t . По-видимому, это означает нормальное падение регистрируемых волн. В этом случае для соблюдения граничных условий вертикальная компонента электрического поля будет тем меньше, чем выше проводимость отражающей поверхности. На соседней станции наблюдается увеличение отношения E_z/H_t . Это можно объяснить тем, что в эту точку преимущественно приходят волны с углом падения отличным от нуля. В точке, расположенной в окрестности проекции области рассеяния, (LOZ) наблюдается плотность потока энергии, распределенная по всему диапазону обратного азимута - 360° (рис. 2а). На достаточно большом удалении от проекции максимум распределения $p(\varphi)$ указывает приблизительно на центр проекции области рассеяния [5, 7].

3.2 Перемещение области рассеяния по долготе

На рисунке 2б представлены спектральная плотность мощности магнитного поля и параметры P_c , E_z/H_t и $p(\varphi)$ во время регистрации всплесков аврорального хисса на станциях KAN и LOZ 5 марта 2019 года 21:29 - 21:36 UT. Рассматриваемое событие, на наш взгляд, является примером перемещения области рассеяния. Из 22-х событий было отмечено только три таких случая. По мере приближения области рассеяния к одной из станций на ней (KAN) начинается увеличение мощности магнитного поля и индекса P_c , а также уменьшение параметра E_z/H_t , при малых изменениях этих параметров или полном их отсутствии (в данном случае) на другой станции (LOZ). Затем начинается плавное возвращение мощности и параметров P_c , E_z/H_t к исходному уровню, соответствующему подстилающему шуму волновода Земля-ионосфера. При этом на другой станции (LOZ) происходят аналогичные изменения во времени этих параметров с некоторой временной задержкой. Величина задержки определяется, по-видимому, скоростью перемещения области рассеяния. В рассматриваемом примере процесс перемещения наиболее ярко отражается во временном изменении распределения плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга (см. рис. 2б). Во время возникновения всплеска в 21:31 UT в KAN на фоне высокого значения индекса P_c и уменьшения отношения E_z/H_t наблюдается «широкое» распределение $p(\varphi)$. Волны приходят в точку наблюдений со всех направлений, что, вероятно, свидетельствует о расположении проекции области рассеяния близко к точке регистрации. Затем распределение $p(\varphi)$ сужается, а его максимум указывает на восток, в направлении станции LOZ. Такие изменения распределения $p(\varphi)$ и сопровождающие их изменения параметров P_c и E_z/H_t , по-видимому, указывают на перемещение области рассеяния в восточном направлении. В LOZ во время возникновения всплеска (~ 21:31 UT) максимум распределения $p(\varphi)$ указывает на запад в направлении станции KAN, где возник авроральный хисс. По мере увеличения мощности всплеска, индекса P_c и уменьшения отношения E_z/H_t распределение $p(\varphi)$ изменяется от «узкого» на «широкое». Вероятно, в это время область рассеяния смещается и становится над точкой LOZ. В 21:33 UT распределение $p(\varphi)$ «сужается», причем его максимум указывает на восток. Происходит смещение области рассеяния к востоку.

3.3 Область рассеяния, вытянутая по долготе, и смешанный тип

На рисунке 2с представлены параметры поля во время регистрации на станциях KAN и LOZ всплесков аврорального хисса при существовании вытянутой по долготе области рассеяния. Событие зарегистрировано 5 января 2019 года в 20:06 — 20:12 UT. Всего отмечено шесть таких событий. Во время существования вытянутой области рассеяния индекс P_c и отношение E_z/H_i принимают близкие значения на обеих станциях (рис. 2с). Максимумы распределения $p(\varphi)$ указывают в направлении соседней станции. В рассматриваемом примере, по-видимому, центр симметрии области рассеивания несколько ближе к KAN, чем к LOZ. Этим можно объяснить различия мощности всплесков на обеих станциях.

Чаще всего (8 случаев из 22) появляются области рассеяния смешанного типа. В основном появляются несколько областей различных размеров. В работе [7] рассмотрен пример такого события. Также в работе проведена интерпретация данных наземных наблюдений с использованием модели распространения аврорального хисса от области генерации до наземного наблюдателя.

Выводы

В работе представлены результаты анализа данных наземных наблюдений аврорального хисса в двух точках - Ловозеро (Россия) и Каннуслахто (Финляндия). Используются данные, полученные за период с 7 ноября 2018 года по 9 февраля 2020 года. Регистрируемые всплески разделены на четыре типа по пространственной структуре области рассеяния: (1) область рассеяния имеет размеры, малые относительно расстояния между станциями; (2) область рассеяния перемещается по долготе; (3) область рассеяния вытянута по долготе; (4) смешанный тип.

Для каждого типа сформулированы отличительные особенности поведения спектральной плотности мощности горизонтальной компоненты магнитного поля, индекса круговой поляризации, отношения вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного и распределения плотности потока энергии по азимутальным углам вектора, обратного вектору Пойнтинга.

Литература

1. Sazhin S.S., Bullough K., Hayakawa M. Auroral hiss: a review // Planet. Space Sci. V. 41. P. 153–166. 1993. doi 10.1016/0032-0633(93)90045-4
2. Hoffman R.A., Laaspere T. Comparison of very-low-frequency auroral hiss with precipitating low-energy electrons by the use of simultaneous data from two OGO 4 experiments // J. Geophys. Res. V. 77. P. 640–650. 1972. doi 10.1029/JA077i004p00640
3. Laaspere T., Hoffman R.A. New results on the correlation between low-energy electrons and auroral hiss // J. Geophys. Res. V. 81. P. 524–530. 1976. doi 10.1029/JA081i004p00524
4. Sonwalkar V.S., Harikumar J. An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities // J. Geophys. Res. V. 105. P. 18.867–18.884. 2000. doi 10.1029/1999JA000302
5. Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. и др. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках // Известия Российской академии наук. Серия физическая. Т.85. №3. С.398–403. 2021. doi 10.31857/s0367676521030200
6. Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г. и др. Первые результаты ОНЧ-наблюдений во время полярной экспедиции “Трансарктика 2019” // Геомагнетизм и аэрномия. Т.60. №2. С.216–219. 2020. doi 10.31857/s0016794020020121
7. Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю. и др. Моделирование прохождения аврорального хисса от области генерации к земной поверхности // Геомагнетизм и аэрномия. Т.59. №5. С. 618–627. 2019. doi 10.1134/S0016794019050079
8. Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. и др. Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к мировому времени // Приборы и техника эксперимента. №5. С.115–125. 2021. doi 10.31857/s0032816221040248
9. Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Лебедь О.М. и др. Устройство для калибровки регистраторов электромагнитного поля // Труды Кольского научного центра РАН. №3. С.75–80. 2017.
10. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1976.